干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

河西走廊罕见强沙尘天气传输及其过程持续特征

杨晓玲[1,2]， 李岩瑛[1,2]， 陈 静[1]， 郭丽梅[1]， 陈 英[1]， 赵慧华[1]

（1. 甘肃省武威市气象局，甘肃 武威 733099；2. 中国气象局兰州干旱气象研究所，甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室，甘肃 兰州 730020）

摘 要：2021年3月15—19日河西走廊出现了近10 a范围最广、持续时间最长的罕见强沙尘天气过程。利用MICAPS常规气象观测资料以及物理量场资料，从天气气候成因、环流形势演变、物理量诊断等方面分析了此次强沙尘天气的传输及过程持续特征。结果表明：(1) 2021年3月14日受强烈发展的蒙古低压槽影响，蒙古国南部及内蒙古中西部爆发了强沙尘暴，前期蒙古国及中国北方异常增暖是导致沙尘暴爆发的诱因之一。(2) 受高空贝加尔湖深厚低压槽后西北气流引导冷空气东移南下、高空急流动量下传、配合地面冷锋过境共同影响，蒙古国中西部高低空的沙尘粒子被输送到河西走廊，造成河西走廊15日凌晨到上午出现局地强沙尘暴和扬沙天气。(3) 强沙尘暴出现后，700 hPa、850 hPa及近地面内蒙古、华北、宁夏及陕西一带盛行偏东气流将蒙古国及内蒙古的沙尘输送到了河西走廊，造成河西走廊15日下午至19日出现浮尘天气。(4) 沙尘天气维持期间，地面冷高压移速缓慢，河西走廊位于地面冷高压后部，地面风速和湿度较小，不利于沙尘的沉降和水平扩散；河西走廊上空盛行下气沉流、逆温层深厚、大气干燥及层结稳定，不利于低层沙尘的垂直扩散和沉降，对沙尘的持续维持起到促进作用。

关 键 词：沙尘；传输；持续；逆温；河西走廊
文章编号：

沙尘暴是我国北方地区春季发生的灾害性天气，往往会造成重大损失。近年来，我国学者在沙尘暴方面取得了很大的进展[1-3]。杨晓玲等[4]对武威市一次沙尘暴天气过程分析指出，强冷空气的卷入使西伯利亚冷槽强烈发展，为沙尘暴的发展提供了动力条件，而西伯利亚冷槽的垂直结构为沙尘暴提供了动量下传机制，地面冷锋后部形成的大风，为沙尘暴的形成创造了基本条件。肖贤俊等[5]对2002年3月一次特强沙尘暴诊断分析发现，该次沙尘暴由蒙古气旋后部冷锋锋生产生的偏西北大风引发，近地面风速的垂直切变和地面热通量的加大使边界层湍流加强扬起地面沙尘，地面锋区附近风场的强水平切变、锋面垂直环流及锋后斜压转换的作用，将地面卷起的沙尘带到高空，引发强沙尘暴。王文等[6]利用模式输出资料对一次强沙尘暴分析发现，高空急流在能量转换过程中起到非常重要的作用。王劲松等[7]对甘肃河西走廊一次强沙尘暴的强风天气形势和地面风场进行数值模拟指出，沙尘暴爆发前3 h河西走廊出现西北大风，并有大风向这一地区明显辐合，沙尘暴发生在地面处于干暖状态的地区。林良根等[8]利用模式结果对一次强沙尘暴天气分析表明，强沙尘暴过程中有明显的干空气侵入，这种干空气侵入将对流层高层高位涡带入低层，促进了对流层低层气旋及对流运动的发展，继而引起强沙尘暴的发生。岳平等[9]从大气层结稳定度角度分析了内蒙古西部和河西走廊一次沙尘暴过程，指出大气层结不稳定起了激发作用，沙尘暴爆发前风速迅速增大，为起沙提供了动力条件。江吉喜[10]利用卫星云图分析1993年5月5日甘肃、宁夏特大沙尘暴指出，这场沙尘暴主要由冷锋前部的一次飑线活动造成。刘淑梅等[11]对2001年4月兰州二次区域性强沙尘暴天气进行了对比分析，总

收稿日期：2021-12-15； **修订日期：**2022-03-26
基金项目：国家自然科学基金面上项目(41975015)；干旱气象科学基金项目(IAM202016)资助
作者简介：杨晓玲(1971-)，女，高级工程师，主要从事天气预报及干旱气候变化研究工作. E-mail: wwqxj6150343@163.com

结了沙尘暴的一些预报思路和要点。目前很多研究工作主要针对典型的沙尘暴或强沙尘暴过程，对浮尘天气关注相对较少[12-15]。

浮尘指在无风或风力较小的情况下，尘土、细沙均匀地浮游在空中，使水平能见度<10 km，具有持续时间长、能见度低、尘土较细、不易消散等特征，易对人体造成较大危害。2021年3月15—19日河西走廊出现了一场维持时间长达5 d的罕见强沙尘天气过程，造成影响较大。本文在分析沙尘天气的气候背景和大气环流形势演变的基础上，着重分析后期浮尘天气的传输和持续特征，旨在找出此次浮尘天气形成和长时间维持的原因，以加深对河西走廊浮尘天气的进一步认识，将为浮尘天气的预报预警提供科学的参考依据，同时对生态环境的保护和改善具有积极意义。

1 研究区概况

河西走廊位于甘肃省西北部，在祁连山以北，合黎山以南，乌鞘岭以西，甘肃新疆边界以东，为西北—东南走向的狭长平地。地域上包括甘肃省的河西五市：武威、张掖、金昌、酒泉和嘉峪关。西部敦煌市与库姆塔格沙漠相连，北部金塔县与巴丹吉林沙漠接壤，东北部民勤县被腾格里沙漠包围。地势南高北低，海拔高度1139~3100 m，年降水量40~410 mm，年蒸发量1500~3311 mm。气候干燥、冷热变化剧烈，自东而西年降水量渐少，干燥度渐大，风大沙多，特别是河西走廊东部民勤县是我国沙尘天气多发地之一。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文选取了2021年3月15—19日MICAPS常规气象观测资料以及物理量场资料，所用资料均由中国气象局天气预报室提供。

2.2 研究方法

采用统计学、天气动力学、诊断分析等方法，结合天气学原理与方法，分析2021年3月15—19日沙尘天气的传输及其持续特征。使用垂直速度场、涡度场表征动力条件，其中垂直速度场为正，表示下沉气流，垂直速度场为负，表示上升气流；涡度场为正，表示辐散，涡度场为负，表示幅合。使用探空资料（T-log$P$）、K指数表征大气稳定度条件，其中T-log$P$图上有逆温层、假相当位温（θse）直线下降、温度露点差（T-Td）大，表示大气层结稳定，反之亦然；K指数越小，大气越稳定，K指数越大，大气越不稳定。

3 结果与分析

3.1 沙尘天气实况与前期气候特征

3.1.1 沙尘天气实况 2021年3月15—19日河西走廊出现了一场罕见的大范围持续性强沙尘天气，其中15日凌晨到上午马鬃山、鼎新、玉门、高台、张掖、民勤6站出现了沙尘暴，张掖、民勤为强沙尘暴，最小能见度分别为248 m、270 m，个别站点出现了扬沙，大多数站点为浮尘，敦煌、瓜州、玉门、鼎新、乌鞘岭5站极大风速大于17.0 m·s^{-1}，多数站点极大风速大于10.0 m·s^{-1}；15日下午到19日区域内所有站点风速明显减小，极大风速小于5.0 m·s^{-1}，所有站点均为浮尘天气，最小能见度在0.1~1.6 km，武威能见度最小，为0.1 km（15日），沙尘天气持续时间长达3~5 d（图1）。15—19日沙尘天气经历了由强变弱的发展变化过程，19日夜间沙尘天气逐渐消散。这次沙尘天气的影响范围和持续时间都是河西走廊近10 a来所罕见的。

3.1.2 前期气候特征 通常沙尘天气爆发前期降水偏少、气温偏高，干燥裸露的地表为大范围沙尘天气的发生提供丰富的沙尘源[16-17]。国家气候中心的数据显示2021年1—3月上旬中国北方大部及蒙古国南部气温较常年同期偏高1~2 ℃，降水异常偏少，

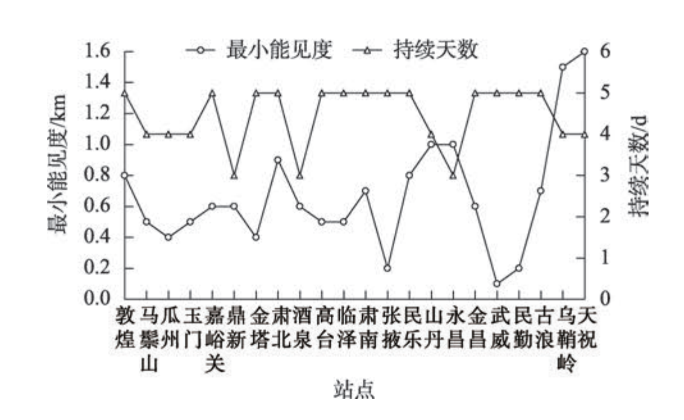


图1 河西走廊2021年3月15—19日沙尘天气最小能见度和持续天数

Fig. 1 Minimum visibility and duration of sand weather on 15—19 March, 2021 in Hexi Corridor

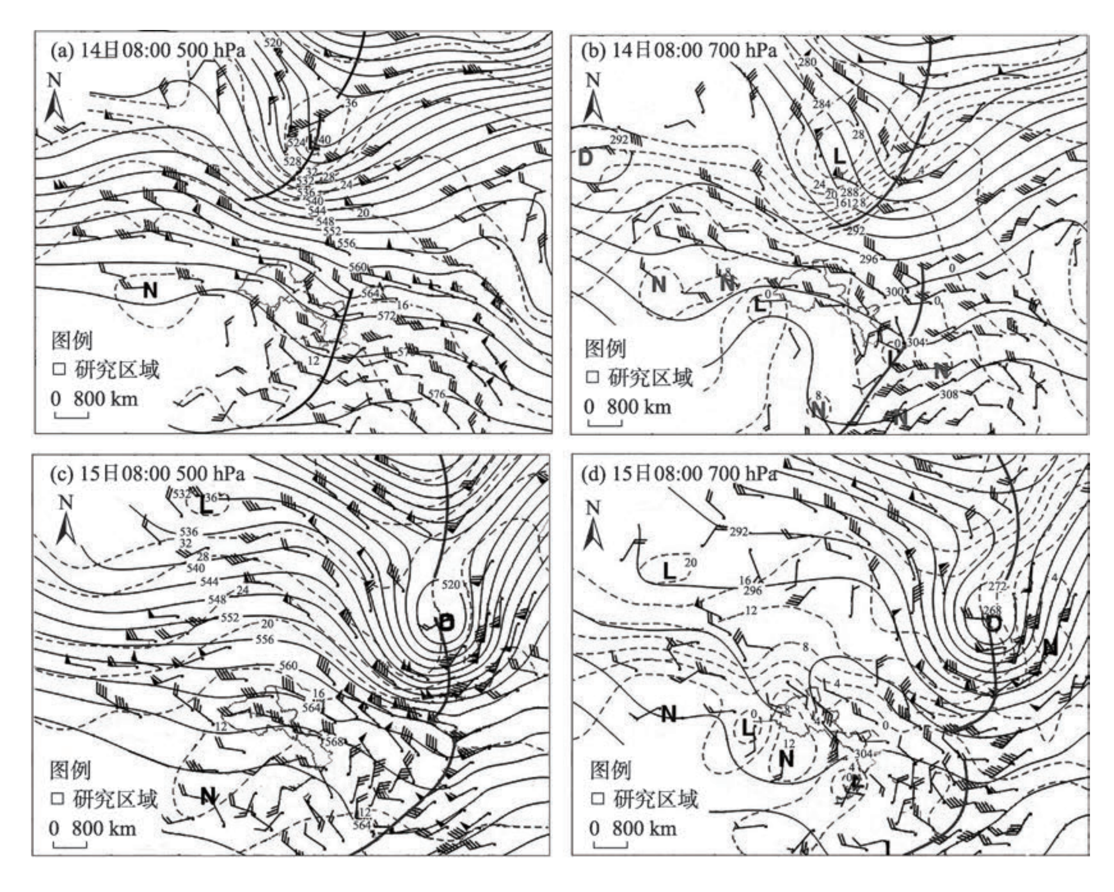
特别是2021年3月上旬西北地区大部、内蒙古中西部、蒙古国西南部气温较同期偏高4~6 ℃，降水偏少，是非常有利于沙尘天气发生的气候条件。另外，根据段伯隆等[18]的研究，2021年3月蒙古国植被覆盖度只有0.07，属高强度沙漠化土地；中国北方植被覆盖度为0.12，属中度沙漠化土地，且3月处于土壤逐渐解冻时期，为沙尘天气的发生提供了良好的沙源。

2021年1—3月上旬河西走廊气温也异常偏高，较历年同期偏高3.7 ℃，特别是2月气温较历年同期偏高4.5 ℃，为有气象记录以来最高，降水持续偏少。前期高温少雨的气候条件、干燥的大气环境不利于浮游尘土、细沙的沉降，是导致3月15—19日河西走廊沙尘天气长时间持续的原因之一。

3.2 大尺度环流形势

3.2.1 高空环流形势 3月14日08:00 500 hPa高度场上，欧亚大陆整体呈“两脊一槽”形势，西伯利亚为高压脊，脊前至贝加尔湖有深厚的低压槽，槽前锋区强烈，伴随冷涡中心强度达-40 ℃，最大风速达42 m·s-1（图2a）。700 hPa贝加尔湖也有深厚的低压槽，伴随冷中心强度达-28 ℃，且冷涡落后于低压槽，低压槽将加深，冷涡前部等温线密集，10纬距内有8条等温线，冷平流非常强，低压槽前部的蒙古国为0 ℃暖中心，槽前后温差达28 ℃，等温线和等压线交角接近90°，具有强斜压性和斜压不稳定特征（图2b），高低空河西走廊均处在西北气流的控制中。随着冷涡的东移南压，500 hPa、700 hPa低压槽强烈发展，14日下午到夜间蒙古国中西部地区爆发了大范围的强沙尘暴，受高空贝加尔湖深厚低压槽后西北气流引导冷空气东移南下，配合高空急流动量下传影响，将蒙古国中西部高空的沙尘粒子输送到河西走廊，15日凌晨至上午河西走廊局地出现了沙尘暴、扬沙等天气。

15日08:00 500 hPa蒙古国的低压槽东移南压至东北地区，并发展为低涡，强度达516 gpm，槽底及槽前最大风速达40 m·s-1（图2c）；700 hPa蒙古国的低压槽发展为低涡，强度达268 gpm，高空冷气团的高度有所下降，低空河西走廊由原来的西北气流



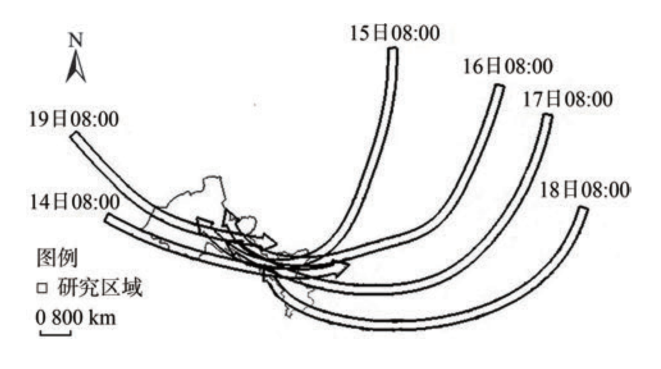
注：实线为等高线/gpm；虚线为等温线/℃；D为高度低中心；L为温度低中心；N为温度高中心。

图2 3月14—15日08:00 500 hPa和700 hPa环流形势

Fig. 2 Circulation situations of 500 hPa and 700 hPa at 08:00 on 14 and 15 March

转为偏东气流(图2d)。15日白天内蒙古中西部出现沙尘暴,甘肃中西部、宁夏北部、陕西北部及华北北部出现大范围的沙尘天气,河西走廊上空500 hPa为西北气流,700 hPa为偏东气流,且均有暖舌从高原伸展到河西走廊,表现为暖平流,即河西走廊上空为下沉气流。16日08:00后,500 hPa除东北地区仍受蒙古气旋影响外,欧亚大陆基本处于平直的纬向环流控制,河西走廊风速小于20 m·s^{-1},对低层的抽吸作用不明显。700 hPa环流形势变化不大,基本为偏东气流,风速在8~10 m·s^{-1},河西走廊高低空均有温度脊,对流层结相对稳定,这种环流形势一直维持到18日20:00(图略),期间河西走廊浮尘天气一直维持。18日夜间新一轮冷空气从新疆进入河西走廊,19日08:00 500 hPa、700 hPa河西走廊均为西北气流控制,风速增大,冷平流明显,浮尘天气逐渐消散。

3.2.2 低空异常偏东北气流 此次沙尘天气维持期间,低空850 hPa从蒙古国到华北经蒙古、宁夏、陕西等地建立了异常显著偏东北气流(图3)。14日08:00新疆到河西走廊为西北气流;15日08:00蒙古国到内蒙古为偏北气流,河西走廊转为偏东气流,受此偏北转偏东气流输送带的影响,低空蒙古国及沿途的沙尘被这支偏北转偏东气流输送到了河西走廊;15日凌晨河西走廊出现了沙尘天气;16—18日这支偏北—偏东气流一直维持,将高空缓慢沉降的沙尘及低空沿途的沙尘源源不断地输送到河西走廊,是河西走廊浮尘天气长时间维持的沙尘来源,由于河西走廊风速较小,本地没有明显的沙尘补充。19日白天河西走廊转为西北气流,沙尘输送路径被切断,但浮尘天气一直持续到了夜间,这可



注:箭头表示气流方向。

图3 3月14—19日08:00 850 hPa气流动态

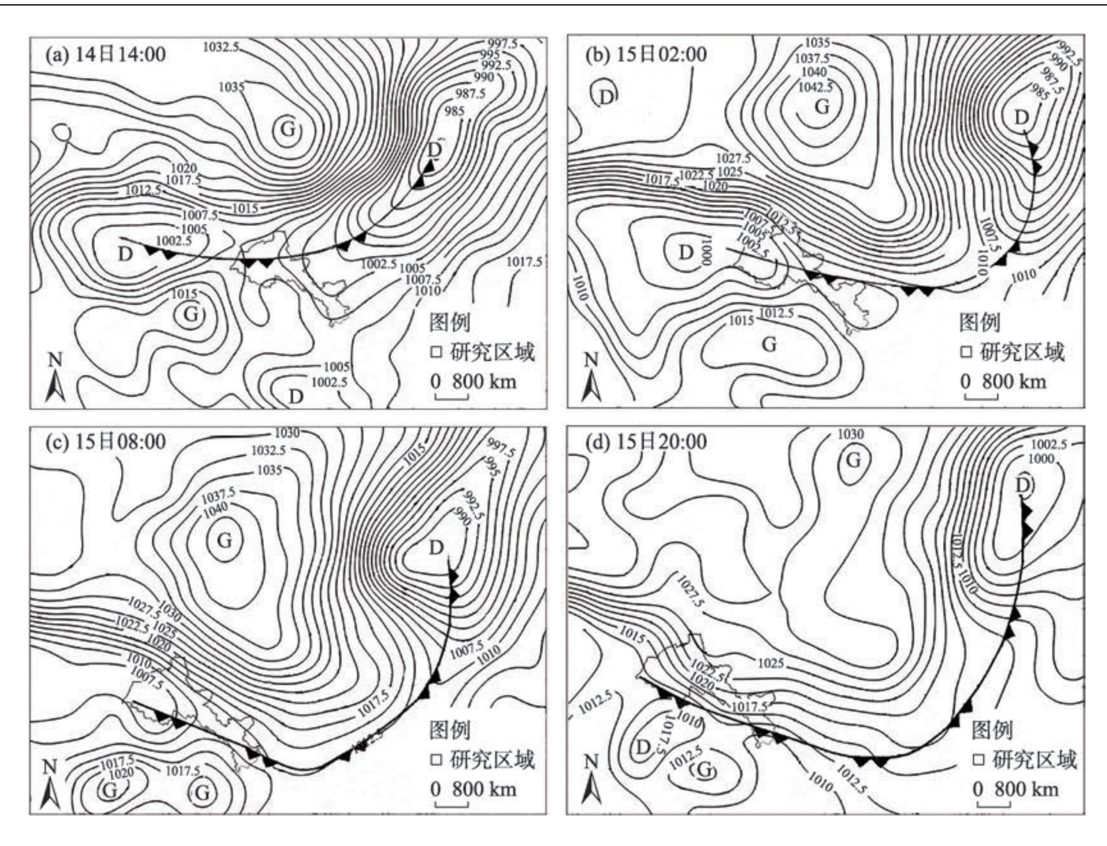
Fig. 3 Airflow dynamic of 850 hPa at 08:00 on 14—19 March

能是由于尘土、细沙的扩散和沉降需要一定的时间,即浮尘天气结束略滞后于天气系统。

3.2.3 地面系统 3月14日14:00地面西伯利亚至蒙古贝加尔湖一带为强盛冷高压,中心强度达1040.0 hPa,其前部蒙古国为强盛热低压,中心强度达885.0 hPa,等压线密集,气压梯度和3 h变压大,高低压中心的差值155 hPa;在等压线密集、3 h变压较大区前部有一强冷锋面,此时锋面后部出现了大风、沙尘暴天气(图4a)。随着冷高压东移南压的影响,14日傍晚到夜间,蒙古国及内蒙古的大部分地方出现了沙尘暴;15日02:00冷高压范围进一步扩大,此时地面锋面底部进入河西走廊西部,冷高压占据了蒙古国及内蒙古的大部分地方,中心强度加强为1042.5 hPa,热低压东移至蒙古东北部到黑龙江一带,新疆为热低压,青藏高原上为冷高压,河西走廊处于鞍型场的中心、强冷高压后部的偏东气流中(图4b);15日02:00—08:00地面锋面自西向东在河西走廊过境是造成15日凌晨至上午出现大风、局地沙尘暴和扬沙天气的原因之一。15日08:00伴随蒙古国及内蒙古冷高压东移南压,其底部偏东气流进一步加强,河西走廊位于冷高压后部偏东南气流中,偏东转偏东南气流将蒙古国、内蒙古及沿途近地面的沙尘输送到了河西走廊,河西走廊出现了大范围的浮尘天气(图4c)。15日20:00河西走廊等压线更加密集,偏东南气流维持(图4d)。16—18日冷高压移速缓慢,河西走廊的偏东南气流一直维持,且风速和湿度较小,不利于沙尘的水平和垂直扩散,使得浮尘天气得以长时间持续(图略)。19日伴随新疆新一轮冷空气的东移,河西走廊偏东气流转为西北气流,且风速增大,水平扩散加大使沙尘逐渐趋于消散。

3.3 动力条件分析

3.3.1 垂直速度场 垂直速度场上,14日20:00 500 hPa新疆处于强烈上升气流中心区,中心值达-1.0×10^{-5} hPa·s^{-1},河西走廊位于其东南部弱上升气流区(图5a);700 hPa新疆也有对应上升气流中心,中心值达-0.6×10^{-5} hPa·s^{-1},河西走廊也位于其东南部的弱上升气流区(图5b),表现为高层上升气流比低层强烈,说明高层对底层具有抽吸作用,大气层结不稳定。15日08:00 500 hPa蒙古国南部、内蒙西部到河西走廊为明显下沉气流中心,中心值达0.4×10^{-5} hPa·s^{-1}(图5c);700 hPa也对应有下沉气流中心,中



注：实线为等压线/hPa；锯齿线为锋面；D为低压中心；G为高压中心。

图4　3月14日14:00和15日02:00、08:00、20:00地面系统

Fig. 4　Ground systems at 14:00 on 14 March, and 02:00, 08:00 and 20:00 on 15 March

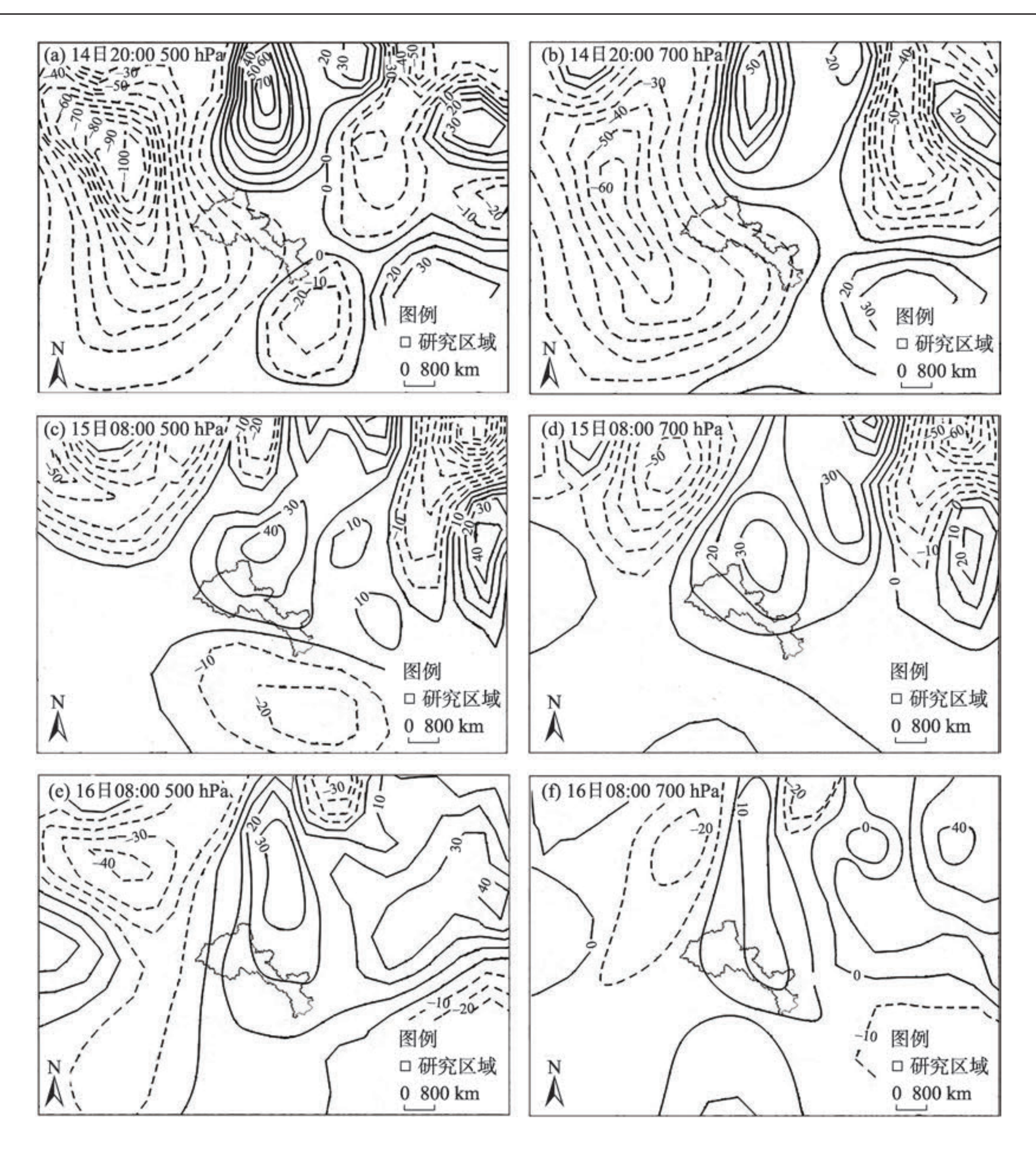
心值达 0.3×10^{-5} hPa·s^{-1}（图5d）。16日08:00 500 hPa、700 hPa河西走廊垂直速度与15日08:00基本一致，中心值分别达 0.3×10^{-5} hPa·s^{-1}（图5e）、0.1×10^{-5} hPa·s^{-1}（图5f）。17—18日下沉气流中心缓慢东移，河西走廊仍处于下沉气流范围内，且15—18日均为高层下沉气流比底层略强，说明大气层结相对稳定。

3.3.2　涡度场　涡度场上，14日20:00 500 hPa新疆东部、甘肃至青藏高原上为明显的辐散带，涡度中心强度为 -3×10^{-5}·s^{-1}（图6a）；700 hPa河西走廊、内蒙古中西部至蒙古国东部为明显的辐合带，涡度中心强度为 10×10^{-5}·s^{-1}，河西走廊位于辐合中心的底部（图6b），表现为高层辐散低层辐合，说明大气层结不稳定。15日08:00 500 hPa甘肃至青藏高原上为辐合带，涡度中心强度为 2×10^{-5}·s^{-1}，河西走廊位于辐合中心的后部（图6c）；700 hPa河西走廊、内蒙古西部至蒙古国为明显的辐散带，涡度中心强度为 -5×10^{-5}·s^{-1}，河西走廊位于辐散中心的底部（图6d）。16日08:00 500 hPa辐合带、涡度中心强度与15日08:00基本一致（图6e）；700 hPa河西走廊至内蒙古为辐散带，强度有所减弱，涡度中心强度为 -2×10^{-5}·s^{-1}，河西走廊位于辐散中心（图6f）。17—18日500 hPa、700 hPa涡度中心缓慢东移，强度有所减弱，河西走廊仍处于高层辐合、底层辐散范围内，即涡度场上也表现为下沉运动，与垂直速度场相一致。

由上述分析可知，14日夜间到15日凌晨河西走廊上升气流明显，大气层结不稳定，易激发高低层对流的发生，使风速增大，为起沙提供了动力条件。15日白天到19日下沉气流在河西走廊上空长时间维持，大气处于相对静稳状态，沙尘天气不易水平和垂直扩散，是沙尘天气长时间维持的主要原因之一[19-21]。沙尘天气维持期间，大气较为稳定，本地起沙条件能力弱。

3.4　大气稳定度

3.4.1　探空资料（T-log$P$）　从稳定度的角度，以民勤站探空曲线为例分析这次河西走廊浮尘天气持续大气层结特征发现，14日20:00 T-log$P$ 图上民勤站几乎未出现逆温层，500 hPa以下大气处于干暖状态，特别是700 hPa至500 hPa非常干燥（图7a），干暖的大气极易触发干对流，为大风沙尘提供了热力



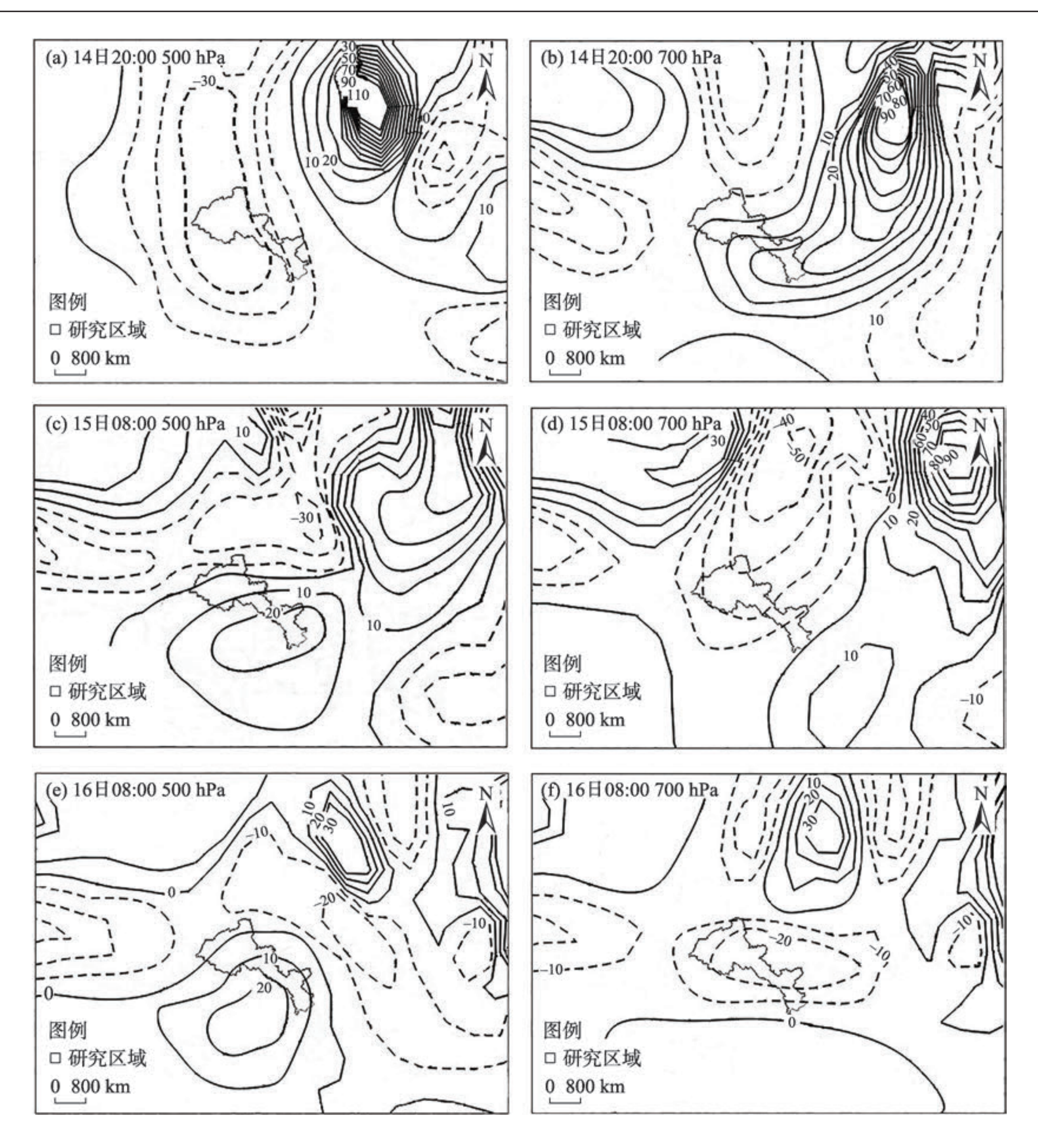
注：实线为正等垂直速度线/10^{-7} hPa·s^{-1}；虚线为负等垂直速度线/10^{-7} hPa·s^{-1}。

图5 3月14日20:00、15—16日08:00 500 hPa和700 hPa垂直速度场

Fig. 5 Vertical velocity fields of 500 hPa and 700 hPa at 20:00 on 14 March and at 08:00 on 15—16 March

不稳定条件。15日08:00 850 hPa和700 hPa之间存在一个明显的逆温层(图7b)；16日08:00逆温层厚度进一步抬升，高度将近750 hPa(图7c)；17日08:00出现了双逆温层，低层850 hPa至2000 m有一较薄的逆温层，700 hPa至600 hPa为深厚逆温层(图7d)；18日08:00双逆温层仍然存在，高度有所降低，低层逆温在850 hPa以下，上层逆温在2800 m至700 hPa(图7e)。持续深厚的逆温层像盖子一样，抑制了沙尘的垂直扩散，对沙尘的维持起到促进作用。另外，15—18日，民勤从地面到高层假相当位温(θse)基本呈直线下降趋势，说明没有不稳定能量，大气层结较为稳定；民勤地面至500 hPa温度落点差(T−Td)在10~30 ℃，说明500 hPa以下大气干燥，特别是近地层非常干燥，不利于低层浮尘的沉降。总之，本次浮尘天气维持期间，河西走廊大气层结极为稳定，这与白冰等[22]、杨静等[23]研究的浮尘天气的垂直结构相一致。

3.4.2 *K*指数 *K*指数场上，14日20:00新疆东部至河西走廊西部为弱的负*K*指数区，河西走廊东部为弱的正*K*指数区(图略)，层结相对不稳定。15日08:00内蒙古至甘肃有*K*指数≤−60 ℃的负中心，河西走廊处于*K*指数负中心后部等值线密集区(图



注：实线为正等涡度线/$10^{-6}\cdot s^{-1}$；虚线为负等涡度线/$10^{-6}\cdot s^{-1}$。

图6　3月14日20:00、15—16日08:00 500 hPa和700 hPa涡度场

Fig. 6　Virticity fields of 500 hPa and 700 hPa at 20:00 on 14 March and at 08:00 on 15—16 March

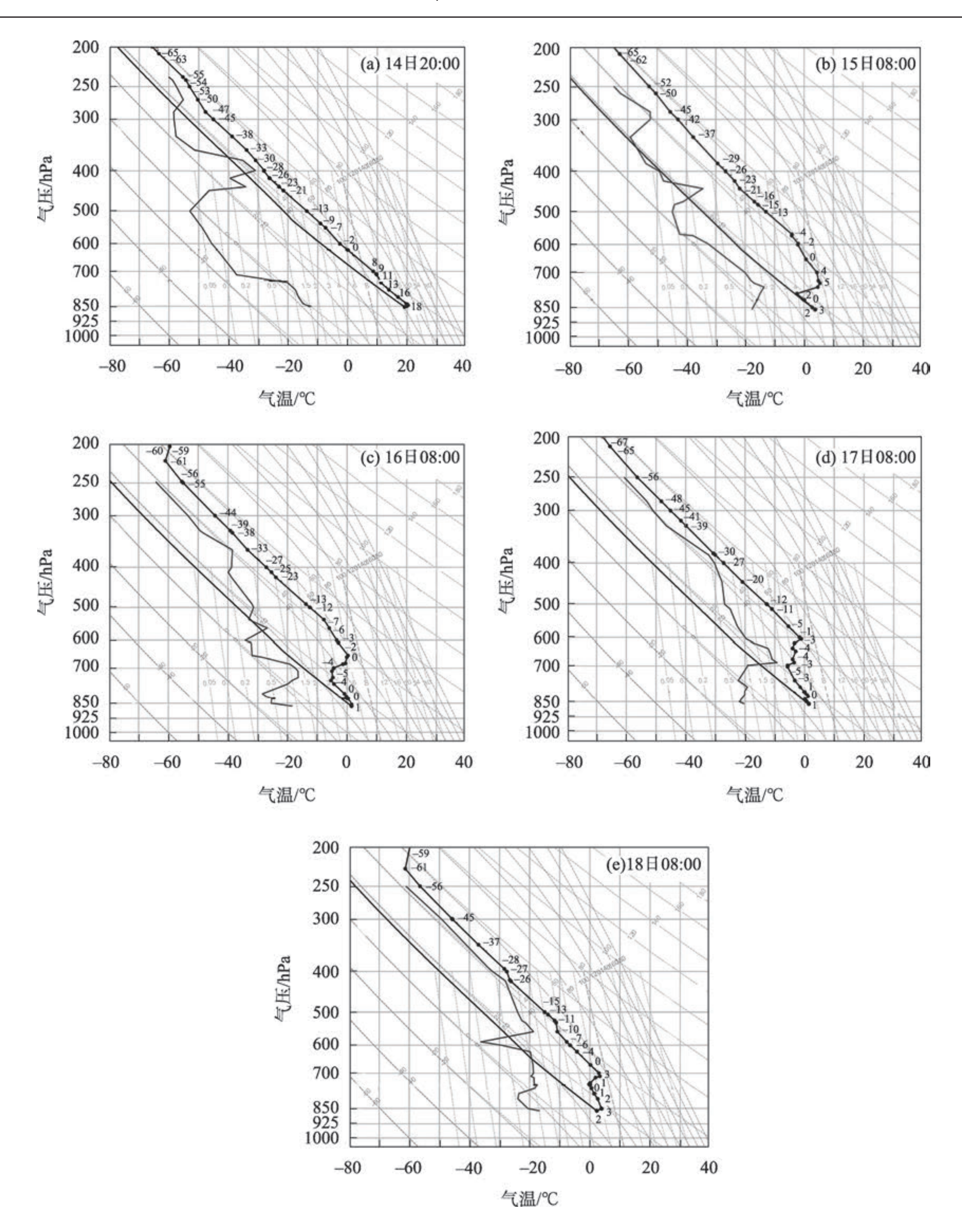
8a)。16日08:00 *K*指数负中心略有东移，强度有所减弱，中心值为−45 ℃(图略)。17日08:00 *K*指数负中心分裂为东西向的2个，一个东移入海，一个仍位于内蒙古至甘肃，*K*指数中心值为−40 ℃，河西走廊处于*K*指数的负值区(图8b)。18日08:00 *K*指数负中心进一步东移减弱，河西走廊仍处在负值的范围内(图略)。这种负*K*指数的配置表明河西走廊上空大气层结非常稳定。

4　结 论

利用MICAPS常规气象观测资料以及物理量场资料，分析研究了河西走廊罕见强沙尘天气传输及其过程持续特征，得到了以下结论：

(1) 3月14日下午到夜间，受强烈发展的蒙古低压槽影响，蒙古国南部及内蒙古中西部地区爆发了强沙尘暴。前期蒙古国及中国北方前期干旱少雨、气温偏高是造成此次强沙尘暴天气的重要原因，植被覆盖度偏低为强沙尘天气的发生提供了较好的沙源。

(2) 3月15日凌晨到上午受贝加尔湖高空深厚低压槽后西北气流引导冷空气东移南下、高空急流动量下传、配合地面冷锋过境共同影响，造成了河



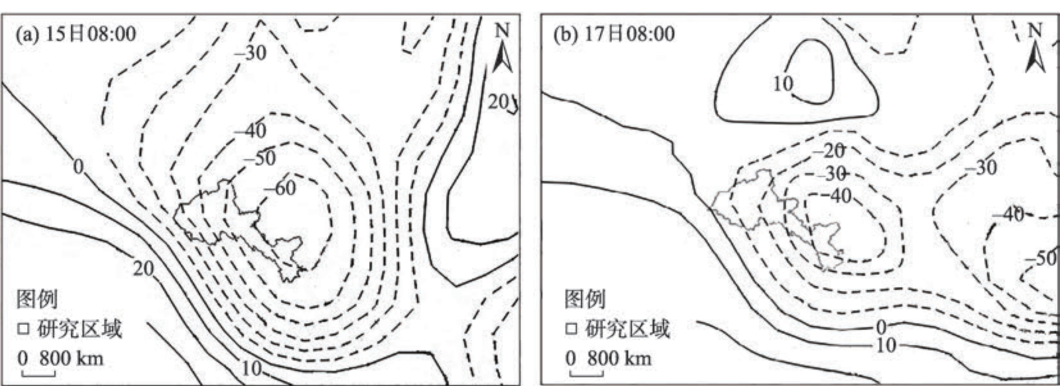
注：折线为露点变化线/℃；带点线为气温变化线/℃；直线为假相当位温变化线/℃。

图7　3月14日20:00和15—18日08:00民勤探空曲线 T–log$P$ 图

Fig. 7　T–log$P$ map of Minqin station detective curve at 20:00 on 14 March and at 08:00 on 15—18 March

西走廊局地大风、沙尘暴、扬沙等天气。强沙尘暴出现后，中低层700 hPa、850 hPa及近地面的偏东北气流将蒙古国、内蒙古及沿途沙尘源源不断输送到了河西走廊，造成了河西走廊15日下午至19日的强浮尘天气，这与杨晓军等[24]模拟的沙尘质点后向轨迹的沙源来自蒙古国东部地区的分析结果较为一致。

（3）浮尘天气维持期间，高低空风速较小，不利于沙尘的垂直输送，地面冷高压移速缓慢，河西走廊位于地面冷高压后部，地面风速和湿度小，不利于沙尘的沉降和水平扩散，对沙尘的持续起到促进作用。另外，沙尘传输至河西走廊后，受祁连山脉



注：实线为正等K指数线/℃；虚线为负等K指数线/℃。

图8　3月15日和17日08:00 K指数场

Fig. 8　K index field at 08:00 on 15 and 17 March

的阻挡而堆积，也是浮尘强度加强和维持的可能原因之一，这一点需在今后的工作中进一步研究。

（4）3月14日20:00垂直速度、涡度、探空曲线及K指数分析表明，高低层盛行上升气流、无逆温层、大气干暖和大气处于相对不稳定状态，有利于大风、沙尘天气的产生。15—18日出现了相反的状态，高低层盛行下沉气流、逆温层深厚、底层大气干燥和大气处于相对静稳状态，抑制了低层沙尘的垂直扩散和沉降，对浮尘的维持起到促进作用。

本文从气候成因、环流形势演变、物理量诊断等方面分析了此次河西走廊沙尘天气发生、传输和长时间持续的原因，仅停留在初步分析诊断的基础上，但沙尘形成的物理机制非常复杂，如边界层的热力不稳定、触发的低层干对流、混合层高度的变化等都对沙尘天气发生发展的具体影响、逆温层高度和厚度对沙尘尘天气强弱的关系如何[25-27]、沙尘传输途中与地形地貌的关系如何及其他特殊气象条件[28-29]对连续沙尘天气的作用等等，还需今后的工作中深入地探讨和研究。此外，本研究得出了“本次浮尘天气维持期间，河西走廊大气层结极为稳定”的结论，这可能是浮尘天气维持的必要条件，这一点有待于在业务应用和科研工作进一步的验证。

参考文献（References）

[1] 王世功，董光荣，陈惠忠，等. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠，2000, 20(4): 349-356. [Wang Shigong, Dong Guangrong, Chen Huizhong, et al. Advances in studying sand-dust storms of China [J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(4): 349-356.]

[2] 李耀辉. 近年来我国沙尘暴研究的新进展[J]. 中国沙漠，2004, 24(5): 616-622. [Li Yaohui. New advances of research on sand-dust storm during recent years in China[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(5): 616-622.]

[3] 张小曳. 2006年春季的东北亚沙尘暴[M]. 北京：气象出版社，2006: 46-47. [Zhang Xiaoye. Spring sand-dust storm in northeast Asia in 2006[M]. Beijing: Meteorological Press, 2006: 46-47.]

[4] 杨晓玲，丁文魁，钱莉，等. 一次区域性大风沙尘暴天气成因分析[J]. 中国沙漠，2005, 25(5): 702-705. [Yang Xiaoling, Ding Wenkui, Qian Li, et al. Diagnosis analysis of a gale and sandstorm weather case[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(5): 702-705.]

[5] 肖贤俊，刘还珠，宋振鑫，等. 2002年3月19日沙尘暴爆发条件分析[J]. 应用气象学报，2004, 15(1): 1-9. [Xiao Xianjun, Liu Huanzhu, Song Zhenxin, et al. The mechanism of a sand storm over China in March 2002[J]. Journal of Applied Meteorology Science, 2004, 15(1): 1-9.]

[6] 王文，隆霄，李耀辉，等. “2003·3”强沙尘暴过程的中尺度动力学诊断分析[J]. 干旱气象，2004, 22(3): 17-21. [Wang Wen, Long Xiao, Li Yaohui, et al. Analysis of mesoscale dynamic diagnosis of “2002·3” sandstorm process[J]. Journal of Arid Meteorology, 2004, 22(3): 17-21.]

[7] 王劲松，李耀辉，康凤琴，等. “4·12”沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析[J]. 高原气象，2004, 23(1): 89-96. [Wang Jinsong, Li Yaohui, Kang Fengqin, et al. Numerical simulation and diagnostic analysis of “4·12” sand-dust storm[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(1): 89-96.]

[8] 林良根，寿绍文，沈之林. 一次强沙尘暴过程中干空气侵入的数值模拟和诊断分析[J]. 南京气象学院学报，2006, 29(3): 371-378. [Lin Lianggen, Shou Shaowen, Shen Zhilin. Numerical simulation and diagnostic analysis of dry invasion in a sandstorm process[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2006, 29(3): 371-378.]

[9] 岳平，牛生杰，王连喜，等. 一次夏季强沙尘暴形成机理的综合

分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 370−374. [Yue Ping, Niu Shengjie, Wang Lianxi, et al. Comprehensive researches on a special dust storm in summer[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(3): 370−374.]

[10] 江吉喜. 1993年5月5日甘肃等地特大沙尘暴成因分析[J]. 甘肃气象, 1993, 11(3): 35−39. [Jiang Jixi. Causes analysis of extremely large sandstorm in Gansu Province and other places on May 5, 1993[J]. Gansu Meteorology, 1993, 11(3): 35−39.]

[11] 刘淑梅, 王学良. 2001年兰州地区春季沙尘暴天气的对比分析[J]. 甘肃气象, 2002, 20(2): 5−8. [Liu Shumei, Wang Xueliang. Comparative analysis of spring sandstorm in Lanzhou area in 2001[J]. Gansu Meteorology, 2002, 20(2): 5−8.]

[12] 郭萍萍, 杨建才, 殷雪莲, 等. 甘肃省春季一次连续浮尘天气过程分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(2): 303−309. [Guo Pingping, Yang Jiancai, Yin Xuelian, et al. Analysis of a continuous floating dust weather in Gansu Province in spring[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(2): 303−309.]

[13] 褚金花, 陈斌, 王式功, 等. 2013年春季兰州一次罕见持续浮尘天气过程分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(12): 58−63. [Chu Jinhua, Chen Bin, Wang Shigong, et al. Analysis of a durative floating dust event over Lanzhou in 2013[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(12): 58−63.]

[14] 张亚茹, 陈永金, 刘永芳, 等. 沙尘影响下华北地区一次重污染天气形成与消散过程分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1241−1250. [Zhang Yaru, Chen Yongjin, Liu Yongfang, et al. Formation and dissipation processes of a heavy atmospheric pollution in north China under the influence of dust[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6): 1241−1250.]

[15] 田磊, 张武, 常倬林, 等. 河西走廊干旱区春季沙尘气溶胶对辐射的影响初步研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 923−929. [Tian Lei, Zhang Wu, Chang Zhuolin, et al. Influence of spring dust aerosol on radiation over the arid area in Hexi Corridor[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 923−929.]

[16] 闵月, 李娜, 汤浩. 2015年春季北疆沿天山一带一次强沙尘暴过程分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(5): 30−37. [Min Yue, Li Na, Tang Hao. Analysis of a strong sandstorm along Tianshan Mountains of northern Xinjiang in spring 2015[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(5): 30−37.]

[17] 常兆丰, 赵明, 韩福贵, 等. 民勤沙尘暴分布的地理因素及其前期气象特征[J]. 干旱区地理, 2009, 32(3): 412−417. [Chang Zhaofeng, Zhao Ming, Han Fugui, et al. Geographical factors affecting sandstorm distribution and characteristics of previous meteorological elements in Minqin County[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(3): 412−417.]

[18] 段伯隆, 刘新伟, 郭润霞, 等. “3·15”北方强沙尘暴天气成因分析[J]. 干旱气象, 2021, 39(4): 541−553. [Duan Bolong, Liu Xinwei, Guo Runxia, et al. Cause analysis on severe dust storm in northern China on 15 March 2021[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(4): 541−553.]

[19] 段海霞, 李耀辉. 2006年北京一次持续浮尘天气过程的分析[J]. 干旱气象, 2007, 25(3): 48−53. [Duan Haixia, Li Yaohui. Analysis of a durative floating dust over Beijing in 2006[J]. Journal of Arid Meteorology, 2007, 25(3): 48−53.]

[20] 马井会, 张国琏, 耿福海, 等. 上海地区一次典型连续浮尘天气过程分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(4): 584−593. [Ma Jinghui, Zhang Guolian, Geng Fuhai, et al. Analysis of a typical dust event in Shanghai[J]. China Environment Science, 2013, 33(4): 584−593.]

[21] 张培, 王高飞, 艾克代·沙拉木. 南疆西部一次浮尘天气过程与传输特征分析[J]. 农业与技术, 2019, 39(6): 148−149. [Zhang Pei, Wang Gaofei, Shalamu Aikdai. Analysis of primary dust weather process and transmission characteristics in western south Xinjiang[J]. Agriculture and Technology, 2019, 39(6): 148−149.]

[22] 白冰, 张强, 吕巧谊, 等. 一次区域沙尘过程的垂直结构和传输路径分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(9): 128−133. [Bai Bing, Zhang Qiang, Lü Qiaoyi, et al. Analysis of the vertical structure and transmission of a regional dust[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(9): 128−133.]

[23] 杨静, 武疆艳, 李霞, 等. 乌鲁木齐冬季大气边界层结构特征及其对大气污染的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(4): 717−723. [Yang Jing, Wu Jiangyan, Li Xia, et al. Analysis of atmospheric boundary layer structure and its effect on air pollution over Urumqi City in winter[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(4): 717−723.]

[24] 杨晓军, 张强, 叶培龙, 等. 中国北方2021年3月中旬持续性沙尘天气的特征及其成因[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 245−255. [Yang Xiaojun, Zhang Qiang, Ye Peilong, et al. Characteristics and causes of persistent sand-dust weather in mid-March 2021 over northern China[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(3): 245−255.]

[25] 马梁臣, 刘海峰, 王宁, 等. 2011年长春市一次持续浮尘天气成因分析[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(6): 24−30. [Ma Liangchen, Liu Haifeng, Wang Ning, et a1. Forming reason of a continuous floating dust event in 2011 in Changchun[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(6): 24−30.]

[26] 李小龙, 方宗义. 2006年两次影响北京的沙尘天气对比分析[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(3): 320−328. [Li Xiaolong, Fang Zongyi. Comparison between two dust weather process affecting Beijing in 2006[J]. Climate and Environmental Research, 2007, 12(3): 320−328.]

[27] 张亚妮, 张碧辉, 宗志平, 等. 影响北京的一例沙尘天气过程的起沙沉降及输送路径分析[J]. 气象, 2013, 39(7): 911−922. [Zhang Yani, Zhang Bihui, Zong Zhiping, et al. Analysis on sand entrainment and deposition and transportation pathways of one sand-dust process in Beijing[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(7): 911−922.]

[28] 仇会民, 周成龙, 杨帆, 等. 塔里木盆地东部地区一次典型区域性沙尘天气分析[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(2): 19−27. [Qiu Huimin, Zhou Chenglong, Yang Fan, et al. Analysis of a typical re-

gional sand-dust in eastern region of Tarim Basin[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(2): 19−27.]

[29] 李耀辉, 任余龙, 寿绍文. 一次强沙尘过程起沙与沙尘输送的位涡分析及模拟研究[J]. 高原气象, 2006, 25(增刊 1): 22−32. [Li Yaohui, Ren Yulong, Shou Shaowen. Analysis on sand entrainment and position vortex of dust transport of a strong dust process and its simulation research[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(Suppl. 1): 22−32.]

Transmission of rare strong dust and its process continuous characteristics in Hexi Corridor

YANG Xiaoling[1,2], LI Yanying[1,2], CHEN Jing[1], GUO Limei[1],
CHEN Ying[1], ZHAO Huihua[1]

(1. Wuwei Meteorological Bureau of Gansu Province, Wuwei 733099, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province/Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Institute of Arid Meteorology of Lanzhou, CMA, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: From March 15 to 19, 2021, a rare strong floating dust weather process with the widest range and longest duration of recent 10 years occurred in the Hexi Corridor of northwestern China. Using the meteorological information comprehensive analysis and process system conventional meteorological observation data and physical quantity field data, the transmission of the strong dust and the continuous characteristics of the weather process were investigated from a weather and climate aspect, circulation evolution, physical quantitative field diagnosis, etc. The results demonstrated that (1) strong dust storms erupted in southern Mongolia and central and western Inner Mongolia because of the strongly developed Mongolian low-pressure trough on March 14. Abnormal warming at an earlier stage in Mongolia and northern China was one of the causes of the dust storms. (2) Due to the common influence of the northwest airflow after a deep low-pressure trough on Lake Baikal guiding cold air to move east and south, high jet momentum transmission, and a ground cold front passing through, dust particles from central and western Mongolia were transported to the Hexi Corridor, causing local sandstorms and sand blowing from early morning to morning of March 15. (3) Prevailing easterly airflow of 700 hPa, 850 hPa and near-ground prevailed in Mongolia, north China, Ningxia, and Shaanxi, which delivered dust from Mongolia and Inner Mongolia to the Hexi Corridor. This caused strong dust weather in the Hexi Corridor after the emergence of strong dust storms from the afternoon of March 15 to March 19. (4) During the floating dust weather period, the northeasterly airflow from the middle-low classes of Mongolia, north China, Ningxia, and Shaanxi was continuously maintained. The ground cold high pressure moving speed was slow; the Hexi Corridor was located at the back of the cold high pressure, and ground wind speed and humidity were low, which was not conducive to dust settlement and horizontal diffusion. The dominant downward airflow, deep inversion layer flow, dry atmosphere, and layer junction stable over Hexi Corridor were not conducive to vertical diffusion and settlement of low-layer dust, which promoted the continued maintenance of floating dust.

Key words: dust; transmission; continuous; reverse temperature; Hexi Corridor